半球形阻止電界型エネルギー分析器を用いた シリコン電界放出電子源のエネルギー分析*

酒井 善基^{*1}・大和田 淳^{*1}・竹内 光明^{*2}

後藤 康仁^{*1}・長尾 昌善^{*3}・辻 博司^{*1}

石川 順三^{*1}・酒井 滋樹^{*4}・木本 恒暢^{*1}

Energy Distribution Measurements of Silicon Field Emitter Arrays with a Hemispherical Energy Analyzer

Yoshiki SAKAI^{*1}, Atsushi OOWADA^{*1}, Mitsuaki TAKEUCHI^{*2},

Yasuhito GOTOH^{*1}, Masayoshi NAGAO^{*3}, Hiroshi TSUJI^{*1},

Junzo ISHIKAWA^{*1}, Shigeki SAKAI^{*4} and Tsunenobu KIMOTO^{*1}

^{*1}Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510, Japan

^{*2}Japan Science and Technology Agency (JST), Innovation Plaza Kyoto, 1-30 Goryouhara, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8245, Japan

^{*3}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Central 2, 1-1-1 Umezono,
Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

^{*4}Nissin Ion Equipment Co., Ltd, 575, Kuze-Tonoshiro-cho, Minami-ku, Kyoto 601-8205, Japan

(Received November 15, 2007, Accepted May 10, 2008)

Energy distribution of n-type silicon field emitter array (Si-FEA) was measured with a hemispherical collector. Adjusting the position, the energy spread and the peak shift of the FEA were lower than those without alignment. The peak shift and wide energy spread became larger with an increase in the extraction voltage or emission current. Some possible reasons of the peak shift and energy spread were discussed.

1. はじめに

近年半導体デバイスの微細化が進むにつれ、イオン注入技術には極度に厳しい条件が求められている。イオンビームの試料への入射角度のばらつきは1%以下であることが求められており、その上大電流かつ低エネルギーでイオン注入を行うことが必要である。このような条件下ではイオンビームはイオンビーム自身のもつ空間電荷により発散する¹⁾。またイオン注入ではターゲットであるシリコンウエハ上の孤立した電極を帯電させ、絶縁破壊を引き起こす問題が次第に顕在化してきている。

そのため次世代イオン注入装置では、イオンビームのもつ空間電荷を相殺してイオンビームの発散を抑えるとともに、ウエハ電極の帯電を緩和する必要がある。そこで我々はシリコンを用いた微小電界放出電子源(Si-FEA)をイオンビームの空間電荷の中和およびウエハ電極の帯電緩和に応用することを提案し²⁾、Si-FEAの特性について報告してきた^{3,4)}。これらの報告の中で、Si-FEAから放出される電子のエネルギーは比較的広い半値幅と、十eV以上に及ぶピークシフトを持つこと、またこれらの値は引き出し電圧の上昇に伴い急

激に上昇することを指摘した⁴⁾。今回、このエネルギー分析法を改善し、エネルギー分布のより高精度な測定を行ったので報告する。

2. 半球形阻止電界型エネルギー分析器

Si-FEAのエネルギー分布を調べるにあたり、我々は阻止電界型のエネルギー分析器を用いている。阻止電界型エネルギー分析器では、コレクタに入射する電子の速度ベクトルと減速電界のベクトルを一致させることで正確な測定が可能となる⁵⁾。そこで我々は、大きな発散角を持つ放出電子のエネルギー分析を行うために、コレクタ形状を半球形とした。これまで球の中心がエミッタの真上になるようにコレクタを設置していたが、正確な位置調整は行っていなかった。そのために2つのベクトルの方向がずれが、大きなピークシフト及びエネルギー幅の一因となった可能性が考えられる。

そこで、2つのベクトルのずれを修正するためにエミッタとコレクタの相対位置の調整が可能な構造とした。具体的には、XYステージと直線導入機により、コレクタを三方向に移動できるよう改良した。エミッタとコレクタ位置の相互の微調整法は以下の通りである。エミッタ位置は固定し、コレクタに少量の電子がコレクタに到達する程度の阻止電圧を印加した状態で、コレクタへの到達電流が最大となるようにコレクタ位置を調整した。この方法で1600 tipsのPt-FEAから放出される電子のエネルギー分析を行ったところ、ピークシフトは0.3 eV、エネルギー半値幅は0.4 eV程度であった。得られたエネルギー分布と、電界強度を 5×10^9 V/mとしてPt-FEAのエネルギー分布を理論的に計算した結果はよく合致した。これまでの測定結果ではピークシフトは0.7

* 平成19年11月15日 第48回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 (〒615-8510 京都市西京区京都大学桂)

^{*2} 独立行政法人科学技術振興機構イノベーションプラザ京都 (〒615-8245 京都市西京区御陵大原 1-30)

^{*3} 独立行政法人産業技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第二)

^{*4} 日新イオン機器株式会社 (〒601-8205 京都市南区久世殿城町 575番地)

Fig. 1 Circuit of measurement.

eV, エネルギー半値幅は0.9 eV 程度であり, 測定精度の向上が確認できた。

3. 測定試料及び測定方法

測定には1024 tips の n-Si-FEA を用いた。作製方法は前報⁶⁾と同様である。測定回路を Fig. 1 に示す。ゲート電極を接地し, エミッタには一定の負電位を与えることで Si-FEA より電子を電界放出させている。この状態でコレクタ電位を GP-IB (IEEE488) を用いて接地電位からエミッタ電位付近まで一定の割合で徐々に下降させ, それぞれの阻止電圧に対応するコレクタ電流を測定した。なおコレクタ電圧源の両端にはコレクタの帯電を防ぐために 200 k Ω の抵抗を設置した。コレクタには直径が 44 mm のステンレス製半球状コレクタを用いた。コレクタの仕事関数はケルビン法により測定し, 4.5 eV とした。また測定中の真真空度は 4.0×10^{-7} Pa 程度であった。

4. 測定結果

Fig. 2 に n-Si-FEA から放出された電子のエネルギー分布のピークシフト量と引出電圧の関係を示す。図にはこれまでに報告したデータ⁴⁾も併せて示した。ピークシフト量はこれまでに報告した値に比べて大きく低減した。また引き出し電圧に比例してピークシフト量は増加する傾向が見られた。

Fig. 3 に n-Si-FEA から放出された電子のエネルギー分布のエネルギー幅と引出電圧の関係を示す。ここでエネルギー幅はエネルギー分布の半値全幅 (FWHM) で定義した。エネルギー幅についてもピークシフト量と同様にこれまでの値に比べて低減している。引き出し電圧に比例してエネルギー幅は増加していることがわかった。

5. 考 察

ピークシフト量, エネルギー幅ともにこれまでの値に比べ低減しており, Pt-FEA と同様, 位置調整により, より正確な測定が可能になったものと考えられる。Pt-FEA と比較して大きく値が低減しているのは, これまでの実験条件下ではコレクタ・エミッタの相対位置が大きくずれていたためと考えられる。

以下ではピークシフトとエネルギー幅の生じる原因につい

Fig. 2 Energy shift of emitted electrons from n-Si-FEA as a function of extraction voltage.

Fig. 3 Energy spread of emitted electrons from n-Si-FEA as a function of extraction voltage.

Fig. 4 Energy shift of emitted electrons from n-Si-FEA as a function of emission current.

て少し考える。嶋脇らは微小電流領域ではバンドベンディングによりピークシフトが生じていると報告している⁷⁾。Fig. 4 に n-Si-FEA の放出電子エネルギー分布のピークシフト量と放出電流の関係を示す。図には嶋脇らのデータ⁷⁾も併せて

Fig. 5 $\ln I^{-1}/V$ plots of n-Si-FEA.

示した. n-Si-FEA は引き出し電圧と同様に放出電流の対数に比例したピークシフトをもっている. また tip 数は異なるものの, ピークシフト量の増加は微小電流領域における増加傾向と類似していた.

これより高電流領域においてもバンドベンディングによるピークシフトが生じていると考えられる. またその他のシフトの原因として, エミッタ先端付近の抵抗による電位降下, シリコンの表面準位からの電子放出, エミッタ表面酸化膜の準位からの電子放出⁸⁾が考えられる. ここでこの n-Si-FEA の抵抗率は $\rho = 0.02 \Omega \cdot \text{cm}$ であるため, エミッタ先端付近の抵抗による電位降下の影響はほとんどない. またシリコンのバンドギャップは 1.1 eV であるため, 表面準位から放出される電子の持つエネルギーが伝導帯とは異なったとしても, それは 1 eV 程度であるものと考えられる. そのためこれらは今回生じているシフトの主たる原因ではないものと考えられる. 今回の測定エミッタ表面の酸化膜の有無は確認できず, 表面酸化膜の影響については今後検討をする必要がある.

バンドベンディングによるピークシフトが生じていると考ええると, ある引き出し電圧を印加しても実際にエミッタ・ゲート間に加わる電圧はピークシフトの分減少する. 実際に今回用いた n-Si-FEA においては直線的な分布を示すべき $\ln I^{-1}/V$ プロット⁹⁾は高電圧部で若干湾曲していた. Fig. 5 に n-Si-FEA の電流電圧特性の $\ln I^{-1}/V$ プロットとピークシフトの分を補正したものを示す. 補正後, $\ln I^{-1}/V$ プロットは高電圧部でやや曲がっており, 直線的な特性に変化することはなかった.

Fig. 6 に n-Si-FEA の放出電子エネルギー分布のエネルギー幅と放出電流の関係を示す. エネルギー幅は微小電流領域に比べ高電流領域では大きな割合で増加している. エネルギー幅が高電流領域において大きく増加している要因として, 放出される電子の電流量が増すと, 電子同士のクーロン相互作用によってエネルギー分布の幅が増大する Boersch 効果¹⁰⁾が考えられる. しかし 1 tip あたりの電流がはっきりしないため, この効果によるものかどうかは今は判断できない. またその他の要因としてエミッタ先端形状のばらつきが

Fig. 6 Energy spread of emitted electrons from n-Si-FEA as a function of emission current.

考えられる. アレイより放出される電子は先端形状のばらつきにより, エミッタ個々の状態に応じた様々なエネルギーが混在しており, そのためにエネルギー幅が大きくなってしまっているのではないかと考えられる. よって, 今後 1 tip の Si-FEA のエネルギー分析を行うことで, 何らかの知見が得られるのではないかと考えられる.

6. ま と め

Si-FEA より放出される電子のエネルギー分析を高精度に行った. その結果 n-Si-FEA では数十 μA 程度の電流領域にまで, 引き出し電圧, 放出電流量の対数に比例したピークシフトおよびエネルギー幅を生じているという結果が得られた. 微小電流領域の測定結果と比較するとピークシフト量では同様の増加傾向があるが, エネルギー幅に関しては異なる性質が見られた. 今後 1 tip の Si-FEA の測定を行うことで, tip 数がピークシフト量, エネルギー幅に与える影響を解明する必要がある.

謝辞

本研究は JST イノベーションプラザ京都の育成研究の一環として行われたものである.

〔文 献〕

- 1) M. Tanjo, S. Sakai, T. Ikejiri, K. Nakao and T. Nagayama: Proceedings of the International Conference on Ion Implantation Technology, eds. H. Ryssel, L. Frey, J. Gyulai, H. Glawnschnig (IEEE, Piscataway, 2000) p. 588.
- 2) J. Ishikawa, Y. Gotoh, K. Nakamura, H. Tsuji, K. Matsuda, N. Nagai, S. Sakai, T. Ikejiri, S. Umisedo and N. Hamamoto: Tech. Dig of the 16th International vacuum Microelectronics Conference. IVMC2003, p. 299.
- 3) T. Kojima, K. Nakamura, Y. Gotoh, H. Tsuji, J. Ishikawa, T. Ikejiri, S. Umisedo, S. Sakai and N. Nagai: Shinku, **48** (2005) 32.
- 4) T. Kojima, K. Nakamura, Y. Gotoh, H. Tsuji, J. Ishikawa, T. Ikejiri, S. Umisedo, S. Sakai and N. Nagai: Extended Abstracts of the 52nd Spring Meeting of the Japan Society of Applied physics and Societies, Saitama, Japan, March 30–April 1, 2005, 30p–V–2 (2005) p. 859.
- 5) H. Adachi: Shinku, **21** (1978) 793.
- 6) A. Oowada, T. Kojima, M. Takeuchi, Y. Gotoh, M. Nagao, H.

- Tsuji, J. Ishikawa, S. Sakai and T. Kimoto: Shinku, **21** (2007) 24.
- 7) H. Shimawaki, Y. Neo and H. Mimura: IEICE Technical Report, ED2005-185 (2005) 15.
- 8) J. Shaw: J. Vac. Sci. & Technol., **B18** (2000) 1817.
- 9) R. Stratton: Proc. Phys. Soc. of London, **B68** (1955) 746.
- 10) H. Boersch: Z. Phys., **139** (1954) 115 [in German].